

FFESSM Comité Interrégional IdF – Picardie	<b>Mémoire d'Instructeur Régional de plongée-sous-marine :</b>  <b>Mécanique des fluides</b>  <b>appliquée à la plongée-sous-marine.</b>	Commission Technique  Page 40/59
--------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------

## 4. RESPIRATION, ESSOUFFLEMENT ET MELANGES TRIMIX !

### 4.1. NOTIONS DE BASE SUR LES PERTES DE CHARGE

Les écoulements d'air sont en général des écoulements dits 'turbulents'. Qu'est-ce que la turbulence ?

L'écoulement d'un fluide est turbulent lorsque celui-ci est animé de mouvements tourbillonnaires permanents produisant un brassage continu du fluide. L'écoulement est alors imprévisible de manière détaillée c'est-à-dire qu'il est impossible de prévoir, en chaque point de l'écoulement et à tout moment, la vitesse et la pression du fluide<sup>33</sup>.

Les tourbillons se produisent par suite des frottements internes auquel le fluide est soumis. Lorsque la vitesse du fluide devient suffisamment importante, une petite perturbation de l'écoulement (due, par exemple, à une aspérité ou à une vibration) se propage dans l'ensemble de l'écoulement. Ceci est mis en évidence sur le schéma suivant où l'on voit l'apparition de la turbulence à partir d'un écoulement laminaire :

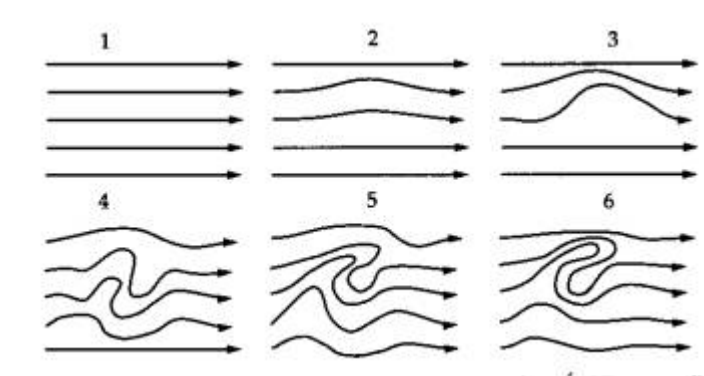


Figure 4.1 : Naissance de la turbulence à la suite d'une petite perturbation (extrait de [11]).

Dans un écoulement turbulent, le frottement des particules fluides dans un tourbillon dissipe plus d'énergie que dans un écoulement laminaire dans lequel ces tourbillons n'existent pas. Il faut donc **fournir plus d'énergie au fluide pour le déplacer d'un endroit à un autre lorsque l'écoulement est turbulent** par rapport au cas où cet écoulement est laminaire.

Cette dissipation d'énergie se traduit par une diminution de la pression du fluide au cours de son écoulement. Ceci s'appelle **la perte de charge**<sup>34</sup>. Celle-ci est beaucoup plus élevée dans le cas d'un écoulement turbulent<sup>35</sup>.

### 4.2. ÉCOULEMENT D'AIR DANS LES VOIES AÉRIENNES

L'objectif de ce paragraphe est d'acquérir une idée globale de l'écoulement d'air dans les voies aériennes.

Des calculs menés sur des ordinateurs puissants, à partir d'une modélisation des voies aériennes supérieures, permettent d'obtenir l'ordre de grandeur des vitesses d'air (et donc du débit) ainsi que la répartition de

<sup>33</sup> Pros : Toutefois, sur des intervalles de temps suffisamment long par rapport au temps caractéristique des tourbillons, on peut définir et prédire une distribution moyenne de la vitesse et de la pression.

<sup>34</sup> On pense souvent que la perte de charge est due aux frottements du fluide sur les parois de la conduite dans laquelle a lieu l'écoulement. En fait cela ne représente qu'une faible partie de la perte de charge totale. La majorité de cette perte de charge est due aux frottements à l'intérieur même des tourbillons présents dans le fluide.

<sup>35</sup> Pros : Le niveau de turbulence du fluide est quantifiée par une grandeur sans dimension appelée le nombre de Reynolds. Ce nombre est fonction de la vitesse du fluide (V), d'une longueur caractéristique de la géométrie de l'écoulement (le diamètre 'D' du tuyau par exemple), de la masse volumique ( $\rho$ ) et de la viscosité dynamique ( $\eta$ )

du fluide :  $Re = \frac{\rho V D}{\eta}$

l'écoulement dans les différentes parties des voies aériennes (les couleurs sont proportionnelles à la vitesse d'air) comme on peut le voir dans le tableau suivant :

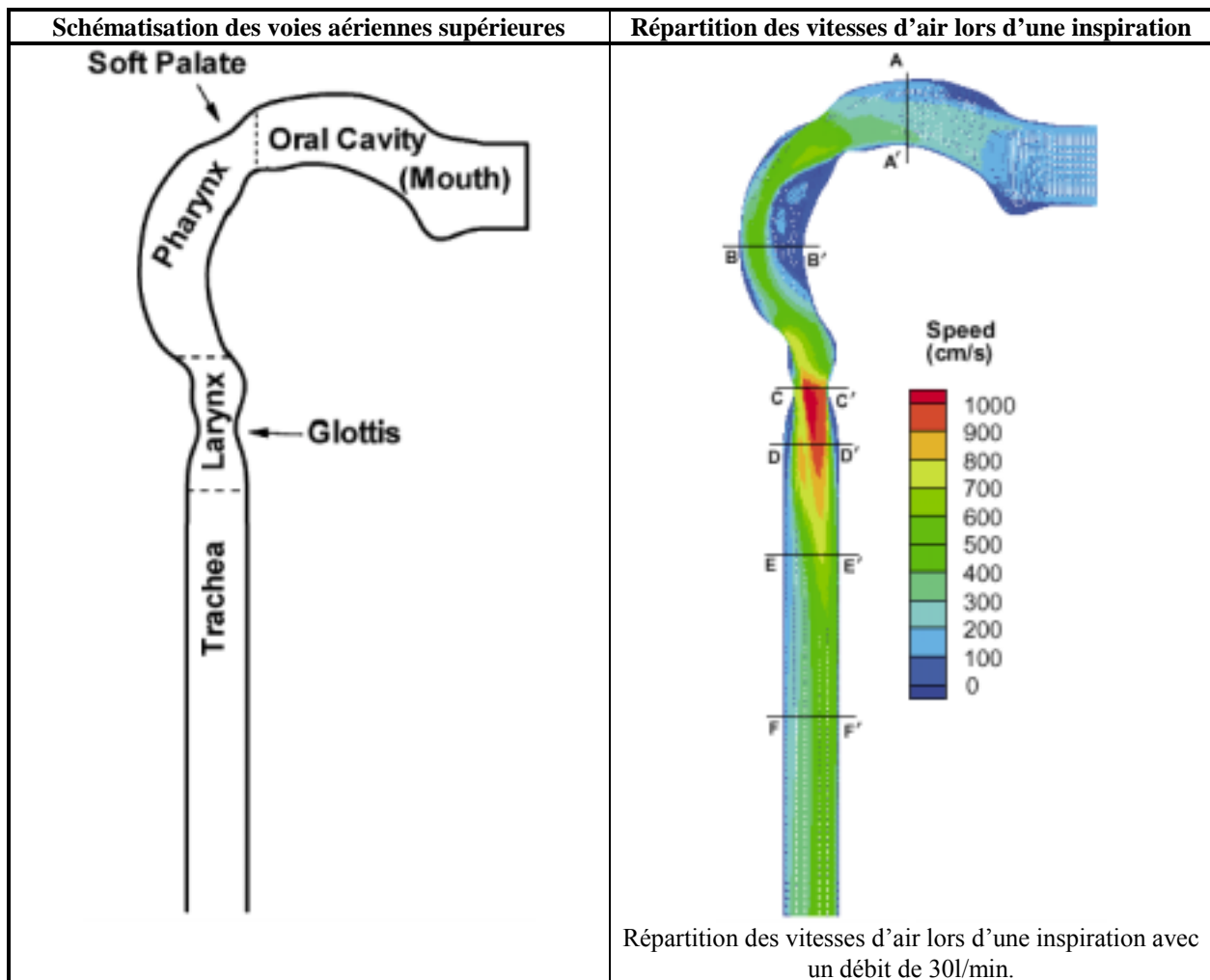


Figure 4.2 : Schématisation des voies aériennes supérieures (extrait de [12]).

Ces calculs permettent de déterminer les pertes de charge dues à l'écoulement du fluide dans les voies aériennes en fonction du débit<sup>36</sup>. On peut constater que la vitesse maximale de l'air est atteinte au niveau de la glotte (section C-C') pour un débit de 30l/min. C'est donc dans cette région que les pertes de charge seront les plus importantes.

La vitesse d'écoulement d'air augmente proportionnellement au débit, qui augmente lui-même proportionnellement à la pression, et donc à la profondeur. L'écoulement va donc devenir de plus en plus turbulent ce qui augmentera d'autant plus la perte de charge. Cela met en évidence le mécanisme **d'augmentation du risque d'essoufflement avec la profondeur**.

Grâce à ces éléments on peut également mieux comprendre les caractéristiques spécifiques de la respiration sous-marine. L'objectif de cette respiration est justement de minimiser les risques d'essoufflement tout en assurant les besoins vitaux d'apport en oxygène et d'élimination du dioxyde de carbone. Pour diminuer ces risques il est nécessaire de limiter au maximum les pertes de charge dues à l'écoulement d'air lors de la ventilation et donc d'avoir un débit d'air le plus faible possible, tout en assurant les besoins vitaux. Pour cela il suffit d'augmenter le

<sup>36</sup> Pros : Les calculs détaillés montrent, d'après [8] que cette perte de charge est proportionnelle à :

$$\Delta P_{\text{VoiesAériennes}} \propto \left[ \frac{4\rho Q}{\eta\pi D} \right]^{-0,55} \frac{\rho}{g\pi^2 D^4} Q^2 \text{ avec } \rho, \eta, g, Q \text{ et } D \text{ respectivement les masse volumique, viscosité dynamique, accélération de la pesanteur, débit d'air et diamètre de la trachée.}$$

FFESSM Comité Interrégional IdF – Picardie	<b>Mémoire d'Instructeur Régional de plongée-sous-marine :</b>  <b>Mécanique des fluides</b>  <b>appliquée à la plongée-sous-marine.</b>	Commission Technique  Page 42/59
--------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------

temps passé ventiler en **augmentant les durées d'inspiration et d'expiration** ce qui permet d'apporter les quantités de gaz demandées par le corps mais sur un temps plus long, donc avec un débit et des vitesses plus faibles ce qui limitera les pertes de charge et donc la fatigue des muscles ventilatoires.

#### 4.3. TORDRE LE COU AUX IDEES REÇUES : ESSOUFFLEMENT ET VISCOSITE.

On entend souvent dire que l'une des causes de l'augmentation du travail ventilatoire est l'augmentation, avec la pression (et donc la profondeur), de la viscosité de l'air. Cette image est certes pédagogique mais elle n'en demeure pas moins totalement fautive, d'autant plus que c'est exactement le contraire qui se produit : la viscosité de l'air **diminue** avec l'augmentation de la profondeur. Etudions cela de plus près.

De manière intuitive on peut dire que la viscosité d'un fluide est associée à la résistance (la force) que l'on doit exercer afin de déplacer un objet dans ce fluide. Par exemple, on sait qu'il faut exercer une force plus grande pour déplacer un objet dans de l'huile plutôt que pour le déplacer dans de l'eau car l'huile est plus visqueuse que l'eau. Il semblerait donc évident que l'augmentation du travail ventilatoire avec la profondeur soit dû à une augmentation de la viscosité de l'air.

Pourtant, il n'existe pas une, mais deux viscosités, et ce, pour chaque fluide<sup>37</sup>. Il s'agit des viscosités suivantes :

- Viscosité dynamique (notée en général  $\eta$ ) : c'est celle dont on vient de parler. La force nécessaire pour mettre en mouvement un fluide (ou un objet dans ce fluide) est d'autant plus forte que la viscosité dynamique de celui-ci est élevée. Elle s'exprime en Pa.s et est typiquement de  $10^{-5}$  Pa.s pour les gaz,  $10^{-3}$  Pa.s pour l'eau et entre 0,1 et 0,01 Pa.s pour les huiles moteurs.
- Viscosité cinématique (notée, en général,  $\nu$ ) : c'est le rapport entre la viscosité dynamique et la masse volumique du fluide considéré. Physiquement, cette viscosité représente la capacité d'un fluide à transmettre un mouvement (ou une impulsion) d'un point A vers un point B. Plus cette viscosité cinématique est faible et plus l'impulsion fournie au fluide en un point A se transmet rapidement au point B.

**Or, en ce qui concerne les gaz (ce n'est pas vrai pour les liquides), la viscosité dynamique reste constante avec la pression<sup>38</sup> et ce, jusqu'à des pressions d'environ 15 bar. Donc, pour des profondeurs inférieures à 150 mètres, on peut dire que l'augmentation du travail ventilatoire n'est pas dû à une augmentation de la viscosité de l'air.**

Alors, comment se fait-il que le travail ventilatoire augmente avec la pression ?

Examinons l'influence de la pression sur l'autre viscosité, c'est-à-dire, la viscosité cinématique. On a :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Or, nous savons que la viscosité dynamique reste constante avec la profondeur. Ceci n'est pas vrai pour la masse volumique puisqu'elle augmente proportionnellement à la pression (ceci est l'application directe de la loi de Mariotte). **On constate donc que la viscosité cinématique diminue avec la profondeur.** Mais qu'est-ce que cela implique au niveau du travail ventilatoire ?

<sup>37</sup> *Pros* : On ne parle ici que des fluides dits 'newtoniens' qui ont un comportement comparable à l'eau. Pour les fluides dits 'non-newtoniens' on ne peut pas définir de viscosité car leurs comportements sont très particuliers (par exemple : ils ne coulent pas comme l'eau). Quelques exemples de fluides 'non-newtonien' : le sang lorsqu'il se trouve dans des petits vaisseaux ou certains fluides alimentaires (mayonnaise, ketchup ou plus généralement les sauces alimentaires qui ont besoin de 'prendre' pour être réussies), la pâte à pain, le mélange eau+maïzena, le sable mouillé, ...

<sup>38</sup> *Pros* : Ceci s'explique, pour les gaz, par le fait que la viscosité dynamique est proportionnelle à l'expression suivante :  $n l \sqrt{m T}$  où  $n$  est le nombre de molécules par unité de volume,  $l$  leur libre parcours moyen (distance moyenne parcourue par une molécule avant d'entrer en contact avec une autre),  $m$  la masse d'une molécule et  $T$  la température. Or, le produit  $n l$  est indépendant de la pression car, lorsque  $n$  augmente,  $l$  diminue dans les mêmes proportions.

FFESSM Comité Interrégional IdF – Picardie	<b>Mémoire d'Instructeur Régional de plongée-sous-marine :</b>  <b>Mécanique des fluides</b>  <b>appliquée à la plongée-sous-marine.</b>	Commission Technique  Page 43/59
--------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------

Eh bien c'est très simple, si la viscosité cinématique diminue, cela favorise l'apparition et le développement de la turbulence au sein du fluide. En effet, une perturbation créée à un endroit du fluide (par une aspérité ou un rétrécissement par exemple) se propagera d'autant mieux que  $v$  est faible.

Or, on a vu au paragraphe 4.1 que plus l'écoulement est turbulent, plus la perte de charge (i.e. : la perte de pression) est élevée ce qui veut dire que l'on doit dépenser plus d'énergie pour faire circuler l'air de la bouche jusqu'aux poumons. Cette énergie correspond au travail ventilatoire puisque cette énergie est fournie par les muscles ventilatoires.

En conclusion on peut donc dire que **l'augmentation du travail ventilatoire avec la profondeur est dû à une augmentation de la masse volumique de l'air** (qui entraîne une diminution de la viscosité cinématique) ce qui favorise l'apparition de la turbulence au sein de l'écoulement d'air dans les poumons. Cet effet est renforcé par l'augmentation du débit, et donc de la vitesse d'écoulement, d'air au niveau des voies aériennes (cf. paragraphe précédent)

Plus simplement, et plus pédagogiquement (pour ne pas partir dans des explications trop complexes), on pourra dire aux élèves que **l'augmentation du travail ventilatoire avec la profondeur est due à l'augmentation de la densité des gaz respirés**. Or, on peut aisément comprendre que plus la densité d'un fluide est importante, plus on doit dépenser d'énergie pour déplacer un volume donné.

#### 4.4. ETUDE DES PROTOCOLES DE PREPARATION D'UN MELANGE TRIMIX.

En règle générale, lorsqu'un plongeur souhaite réaliser un mélange Trimix (Hélium, Azote, Oxygène) dans un bloc initialement vide, il a le choix entre plusieurs possibilités :

- Mettre en premier l'oxygène, y ajouter l'Hélium puis compléter avec de l'air.
- Réaliser au préalable un mélange Nitrox en mettant d'abord l'oxygène puis de l'air dans le bloc et compléter avec l'Hélium pour atteindre les pourcentages désirés.

L'hélium (4g/mol) étant un gaz beaucoup plus léger que l'oxygène (32g/mol) et l'azote (28g/mol) on pourrait, lors de la réalisation du mélange, se retrouver avec un mélange où l'hélium surnagerait au-dessus du mélange azote-oxygène. Il est donc nécessaire, lorsqu'on réalise un trimix, d'homogénéiser le mélange obtenu pour éviter de respirer un gaz hypoxique.

Pour se prévaloir de ce risque, les plongeurs fabriquant des Trimix ont mis au point des procédures dites d'homogénéisation. Chacun a développé « sa » propre technique sans forcément se baser sur des éléments scientifiques. Voici quelques unes de ces procédures :

1. Attendre un temps plus ou moins long (entre 6h et 1 semaine<sup>39</sup>) après le gonflage avant d'utiliser le mélange.
2. Rouler la bouteille à l'horizontale pendant 2h puis laisser reposer 6h.
3. Attendre 6h en stockant la bouteille à l'horizontale.
4. Gonfler rapidement les blocs et ne rien faire de particulier ensuite.

L'objectif de ce paragraphe est de voir si des connaissances en mécanique et en physique des fluides peuvent nous aider, si ce n'est à répondre à ces questions, au moins à étudier leur bien fondé.

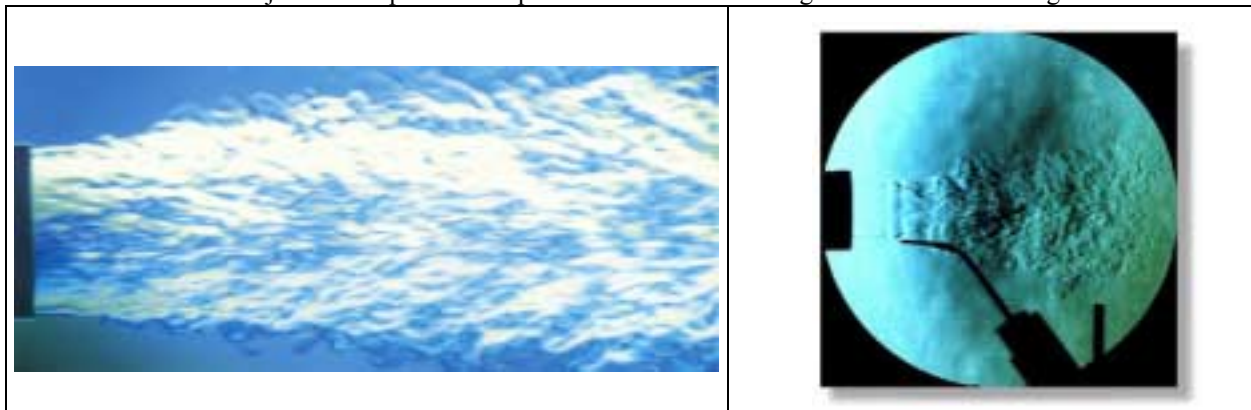
Ces 3 procédures jouent en fait sur deux principes de mécanique des fluides :

- La diffusion de la matière : lorsque qu'un gaz A est mis en contact avec un gaz B, celui-ci tend à diffuser à l'intérieur du gaz avec une vitesse qui dépend de la nature des deux gaz et de leurs concentrations respectives. Il s'agit du même type de processus que celui de la dissolution d'un gaz dans un liquide que nous connaissons bien en plongée. La vitesse de diffusion est décrite au moyen d'une grandeur physique appelée le coefficient de diffusion que l'on notera  $D$ . La diffusion de matière est un phénomène assez lent.
- Le mélange induit par la turbulence : lorsqu'un gaz A est injecté dans un gaz B avec une vitesse importante, il se produit un mélange turbulent de ces deux gaz, d'autant plus important et rapide que la vitesse d'éjection est grande. La Figure 4.3 représentant un jet de  $\text{CO}_2$  dans de l'air met en évidence ce phénomène. On y voit clairement la turbulence générée ainsi que le

<sup>39</sup> Cette forte disparité des temps d'attente atteste bien du caractère non raisonné des différentes techniques. De plus, lorsqu'on leur demande pourquoi ils attendent ce temps là, ils sont souvent incapables de le justifier.

FFESSM Comité Interrégional IdF – Picardie	<b>Mémoire d'Instructeur Régional de plongée-sous-marine :</b>  <b>Mécanique des fluides</b>  <b>appliquée à la plongée-sous-marine.</b>	Commission Technique  Page 44/59
--------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------

mélange des deux gaz qui augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la zone d'injection. Ce phénomène permet d'accélérer l'homogénéisation d'un mélange.



**Figure 4.3 :** Jet de CO<sub>2</sub> (à gauche) et d'un gaz non précisé (à droite) dans de l'air initialement au repos (extrait de [3] et d'un site Internet).

Nous allons calculer le temps maximal d'homogénéisation d'un mélange trimix ce qui revient à considérer que cette homogénéisation n'est due qu'à la diffusion de matière. Nous verrons ensuite que la turbulence de jet permet de réduire ce temps maximal, surtout lorsqu'on injecte l'hélium dans l'air.

#### 4.4.1. Estimation du temps maximal d'homogénéisation d'un mélange trimix.

Pour estimer le temps maximal nécessaire à l'homogénéisation d'un trimix nous allons considérer que seul le mécanisme de diffusion de matière agit. On imagine donc qu'après remplissage du bloc on a une strate d'hélium qui surnage au-dessus d'un mélange d'azote et d'oxygène. Nous allons calculer le temps nécessaire à l'hélium pour atteindre, par diffusion moléculaire, le fond du bloc de plongée en étant initialement situé dans la partie la plus haute du bloc.

On considère que le mélange azote-oxygène est de l'air et qu'il est homogène tout de suite après le gonflage<sup>40</sup>.

Le problème d'homogénéisation du trimix est alors uniquement lié à la présence de l'Hélium. Le coefficient de diffusion de l'Hélium dans l'air est de 0,62cm<sup>2</sup>/s (<sup>41</sup>).

On peut montrer que la diffusion spatiale d'une quantité de gaz est proportionnelle à  $\sqrt{Dt}$  où D est le coefficient de diffusion du gaz dans le milieu considéré. Si nous appliquons cela au cas d'une bouteille de 18 litres (qui est, avec la bouteille de 20 litres, la bouteille la plus haute de celles rencontrées actuellement le marché français) dont la hauteur est d'environ 80cm nous obtenons un temps maximal d'homogénéisation de l'ordre de :

$$t_{\text{Hom\_BlocDebout\&Im mobile}} \approx \frac{x^2}{D} = \frac{80^2}{0,62} = 10322\text{s} = 172 \text{ min} = 2\text{h}52'$$

Donc, le temps mis par de l'Hélium situé en haut de la bouteille pour atteindre le fond de la bouteille (dans le cas où la bouteille est en position debout), et ce, uniquement par diffusion moléculaire est de l'ordre de 3 heures. En prenant un coefficient de sécurité de 2 ou 3 on peut considérer que le temps maximum d'homogénéisation d'un mélange trimix est de l'ordre de 6 à 9 heures. On peut donc conclure qu'attendre l'homogénéisation d'un mélange trimix, pour un bloc debout et immobile, plus de 9h semble très conservatif.

<sup>40</sup> Cette hypothèse est justifiable dans la mesure où un mélange Nitrox est homogène immédiatement. Cela peut se vérifier aisément en fabriquant un tel mélange et en faisant son analyse immédiatement après le gonflage puis régulièrement pendant 1 à 2 heures. On constate que l'analyse de l'oxygène du nitrox ne varie que de 1 à 2% ce qui correspond en fait au temps nécessaire pour que la turbulence produite par le gonflage se calme.

<sup>41</sup> Cette valeur est celle mesurée à -29°C. On considèrera que cette valeur est identique à celle mesurée à température ambiante (~20°C). Cette hypothèse est plus conservative puisque l'agitation moléculaire augmentant avec la température, ce coefficient doit également augmenter lorsque la température croît. La diffusion de l'hélium dans l'air à 20°C est donc plus importante qu'à -29°C.

FFESSM Comité Interrégional IdF – Picardie	<b>Mémoire d'Instructeur Régional de plongée-sous-marine :</b>  <b>Mécanique des fluides</b>  <b>appliquée à la plongée-sous-marine.</b>	Commission Technique  Page 45/59
--------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------

A titre d'exemple voyons maintenant quelle est l'influence de la position de stockage sur ce temps maximal d'homogénéisation. On se place dans le même cas que précédemment mais en considérant que la bouteille est conservée couchée et non plus debout. La distance à parcourir pour l'hélium est alors beaucoup plus faible puisqu'elle correspond au diamètre de la bouteille (environ 20cm) et non plus à sa longueur. On a alors :

$$t_{\text{Hom\_BlocCouché\&Im mobile}} \approx \frac{x^2}{D} = \frac{20^2}{0,62} = 645\text{s} \approx 11 \text{ min}$$

On voit donc qu'en stockant la bouteille couchée après gonflage, le temps maximal d'homogénéisation est très fortement diminué. Ceci est corroboré par les renseignements pris auprès de la société Air Liquide qui indique une forte diminution du temps d'homogénéisation des mélanges lorsque les bouteilles sont conservées en position couchée.

**En conclusion on peut dire que l'ordre de grandeur théorique du temps maximal d'homogénéisation d'un mélange trimix est le suivant :**

- **De l'ordre de 9 heures si le bloc est stocké en position debout.**
- **De l'ordre de 1 à 2 heures si le bloc est stocké en position couchée.**

Nous allons maintenant voir comment on peut encore diminuer ce temps d'homogénéisation ou augmenter la marge de sécurité que l'on prend.

#### 4.4.2. *Influence de l'ordre d'injection des gaz.*

Tout d'abord on peut remarquer que l'ordre d'injection des différents gaz joue un rôle important dans l'homogénéisation du mélange.

Des contacts auprès de la société Air Liquide sur leurs procédures d'homogénéisation ont permis de confirmer que l'homogénéisation est d'autant plus rapide qu'on introduit, de manière séquentielle, les gaz dans l'ordre croissant de leur masse molaire respective. Donc, si on injecte en premier l'hélium, puis l'azote et enfin l'oxygène, le mélange est homogène quasiment instantanément. De même si on injecte de l'air ou un nitrox dans de l'hélium.

Cette méthode, facilement réalisable dans un contexte industriel, est plus complexe à mettre en œuvre dans un contexte de plongée sportive. En effet, on utilise souvent des transferts de gaz par différence de pression partielle entre le réservoir de gaz pur (en général une B50) et le bloc de plongée. Lorsque ce transfert n'est pas possible (pression du bloc supérieure à celle de la B50) on comprime alors le gaz pur avec un compresseur de plongée classique. Or, on sait que ce type de matériel ne doit pas être utilisé pour comprimer un mélange trop enrichi en oxygène à cause de la présence conjointe d'huile et de chaleur dans les étages de compression ce qui entraîne un risque très important de combustion de l'huile et de dégradation du compresseur.

En revanche, si on utilise un surpresseur compatible avec l'oxygène, cette procédure peut être mise en place. Le temps d'homogénéisation est alors quasiment instantané (i.e : inférieur à 1 heure), pour peu qu'on ait gonflé de manière classique (i.e. : en un temps minimal).

Afin de **pouvoir utiliser cette technique dans un cadre de plongée sportive** on peut « renverser » le problème. En effet, si on utilise un tube plongeur allant jusqu'au fond du bloc, ou si on **gonfle le bloc à l'envers** avec un tube plongeur classique, on peut inverser l'ordre d'injection des gaz, c'est-à-dire injecter du plus lourd (oxygène) au plus léger (hélium) en conservant un temps d'homogénéisation très faible.

Cette diminution du temps d'homogénéisation est **due à la turbulence** créée lors de l'injection des gaz dans le bloc. Cette turbulence de jet est assez importante, surtout pour un jet d'Hélium dans de l'air initialement au repos comme on peut le voir sur la Figure 4.4. En effet, si on compare la forme de ce jet avec celles présentées à la Figure 4.3 (jet de CO2 dans de l'air, c'est-à-dire de gaz ayant des masses molaires très proches) on constate que la turbulence créée par un jet d'hélium dans de l'air est beaucoup plus importante que celle d'autres gaz. Cette augmentation du mélange turbulent vient principalement des jets collatéraux que l'on voit apparaître à partir d'une certaine vitesse d'injection (de l'ordre de 10m/s).

FFESSM Comité Interrégional IdF – Picardie	<b>Mémoire d'Instructeur Régional de plongée-sous-marine :</b>  <b>Mécanique des fluides</b>  <b>appliquée à la plongée-sous-marine.</b>	Commission Technique  Page 46/59
--------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------

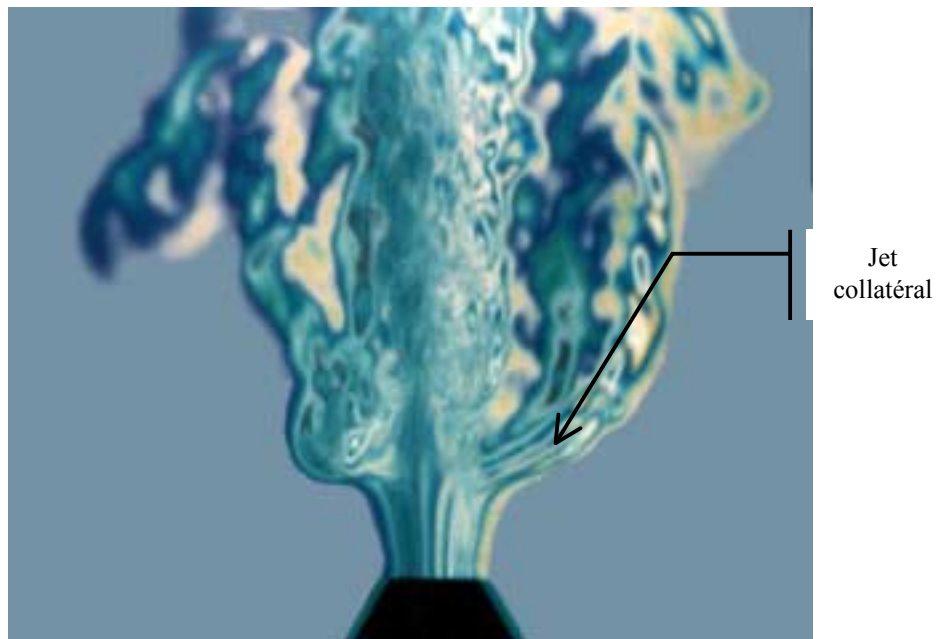


Figure 4.4 : Jet ascendant d'Hélium à environ 10m/s dans l'air initialement au repos (extrait du site <http://www.imft.fr>).

Ces jets collatéraux (et donc le mélange turbulent) sont d'autant plus importants que la **vitesse d'éjection de l'hélium dans le mélange initial (air ou nitrox) sera grande**. On peut évaluer cette vitesse en suivant la procédure suivante :

1. *Calculer le débit massique moyen d'hélium* : il suffit de mesurer le temps mis pour injecter la totalité de l'hélium dans le bloc de plongée et, en considérant que l'hélium est un gaz parfait<sup>42</sup>, en déduire le nombre de moles de gaz transvasées de la B50 au bloc de plongée. Grâce à la masse molaire de l'hélium (4g/mol) on en déduit la masse d'hélium transvasé puis, en divisant par le temps, le débit massique moyen d'hélium transvasé.
2. *Calculer la vitesse d'éjection de l'hélium* : le débit massique moyen est égal au produit de la vitesse moyenne d'éjection par la surface de la section de passage du tube plongeur.

Si cette vitesse est supérieure à 10m/s alors on sait que les jets collatéraux sont apparus. Le mélange turbulent aura donc été très important et le temps d'homogénéisation très faible (inférieur à l'heure).

**Remarque importante :** Les jets collatéraux n'apparaissent, à partir de cette vitesse d'injection, **que dans le cas où l'écoulement d'hélium dans l'air (ou dans un nitrox) est ascendant**, c'est-à-dire que le gonflage aura été fait avec le **bloc retourné** et que **l'oxygène et l'azote auront été mis en premier**. Dans le cas d'un écoulement descendant ces vitesses ne sont pas du tout les mêmes et les conclusions de ce paragraphe ne seraient pas les mêmes.

En conclusion on peut dire que :

- Le temps maximum d'homogénéisation d'un mélange trimix est compris entre 2 et 9 heures selon qu'on stocke le bloc de plongée couché ou debout.
- On peut réduire ce temps d'homogénéisation (dans le cas du temps le plus long) ou augmenter la marge de sécurité (dans le cas du temps le plus court) en gonflant le bloc la tête vers le bas et en vérifiant que la vitesse moyenne d'injection de l'hélium dans le nitrox (ou l'air) est supérieure ou égale à 10m/s. Dans ce cas le temps d'homogénéisation est de l'ordre de 1 heure (temps nécessaire à la tranquilisation du mélange).

De manière pratique, et dans un cadre de plongée sportive, on peut conseiller de préparer les mélanges trimix la veille du jour où l'on souhaite s'en servir, avec un stockage en position couchée, ce qui laisse une marge de sécurité plus que confortable.

<sup>42</sup> Ce qui n'est pas totalement vrai puisqu'une B50 d'hélium ne contient pas 10m<sup>3</sup> de gaz mais environ 9m<sup>3</sup>.

FFESSM Comité Interrégional IdF – Picardie	<b>Mémoire d'Instructeur Régional de plongée-sous-marine :</b> <b>Mécanique des fluides</b> <b>appliquée à la plongée-sous-marine.</b>	Commission Technique Page 47/59
--------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------

Dans un cas d'urgence, par exemple lors d'un secours de plongée souterraine nécessitant des plongées profondes répétées, on pourrait mettre en place es procédures afin de pouvoir utiliser des mélanges dans l'heure suivant leur réalisation.